

УДК 669.162.263

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБЖИГА РУДОУГОЛЬНЫХ ОКАТЫШЕЙ НА КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЕ*

*Швыдкий В.С., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (vshvid@isnet.ru)*

*Ярошенко Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)*

*Спириин Н.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)*

*Лавров В.В., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (v.v.lavrov@urfu.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

Аннотация. Выполнена разработка математических моделей процесса обжига рудугольных окатышей на конвейерной машине. Структура рудугольных окатышей представляет собой сферу, состоящую из равномерно распределенных гранул руды, известняка и топлива, радиусы которых задаются исходя из возможностей мельничного оборудования. Рассмотрены вопросы теплообмена между газом и материалом в поперечно продуваемом плотном слое, дано описание явлений сушки и охлаждения материалов, в том числе и водовоздушной смесью, процессов окисления рудных составляющих окатышей, диссоциации известняка и горения топливных составляющих материала. В связи с недостаточной изученностью многих сопутствующих явлений широко используются эмпирические и полумпирические зависимости. Приведены уравнения инженерных математических моделей восстановления оксидов железа и горения топливных гранул, нагрева колосниковой решетки (тележек) машины и т.д. При расчете развития физико-химических превращений в объеме окатыша принималось, что любая химическая реакция с поверхности гранул того или иного компонента протекает по всей внутренней и внешней поверхности окатыша, причем потенциал процесса (разность концентраций газообразного реагента) является функцией радиуса окатыша, константы скорости реакции и коэффициента диффузии реагента в микропорах окатыша. В то же время реагирование в индивидуальной грануле имеет фронтальный характер, и степень завершения процесса может быть выражена через радиусы непрореагировавших объемов гранул. Из всего множества физико-химических явлений, сопровождающих процесс обжига рудугольных окатышей, данная математическая модель непосредственно учитывает лишь основные, которые находят отражение в материальном балансе и могут быть проверены экспериментально. Конечноразностная аппроксимация уравнений математической модели совместно с выражениями для расчета теплофизических характеристик теплоносителей, коэффициентов теплообмена, термодинамических и кинетических констант и т.д. составили основу численной модели конвейерной обжиговой машины, производящей металлизированные окатыши. Реализация этой модели в частном случае и представлена ниже.

Ключевые слова: слоевой процесс, теплообмен, гранулы окатыша, математическое описание, инженерные модели, эквивалентные характеристики.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-329-335

Математическое моделирование находит широкое применение при анализе и совершенствовании процессов агломерации и обжига железорудных окатышей на обжиговых машинах [1 – 6]. При этом физико-химические превращения, протекающие в слое, учитываются косвенно через кажущиеся теплоемкости. В то же время разработка новых технологий процесса обжига и новых конструкций агрегатов для получения железорудного сырья требует более подробного анализа закономерностей развития фазовых и химических процессов в обрабатываемом материале. В наибольшей

степени эти потребности проявляются при изучении влияния технологических и теплотехнических факторов на процессы восстановления железосодержащих компонентов шихты (процессы металлизации), при обжиге офлюсованных рудугольных окатышей.

Все многообразие процессов, протекающих при обжиге таких окатышей, учесть трудно (практически невозможно). С другой стороны, в этом нет необходимости, поскольку гомоморфизм объекта (агрегата) в его модель имеет место, если изображение процесса в агрегате сохраняет наиболее существенные свойства реального объекта и передает их в математической форме. Поэтому в математической модели процесса обжига целесообразно учитывать лишь те процес-

* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

сы, параметры которых можно проверить экспериментально, а именно: процессы сушки окатышей, окисления и восстановления рудных составляющих шихты, диссоциации известняка, взаимодействия углерода топлива окатышей с компонентами газовой фазы, с диоксидом углерода, образующейся при диссоциации известняка и т.п. Все процессы явления, не включенные в модель, учитываются через параметры адаптации модели.

Если считать, что все физико-химические процессы протекают в объеме окатышей, каждый из которых представляет собой сферическую частицу, состоящую из равномерно распределенных гранул руды, известняка и топлива, радиусы которых составляют соответственно r_p , r_m и r_t , то представляемая ниже система уравнений определяет ядро математической модели.

Уравнение баланса тепла газов

$$-G_{c.g.} \left\{ [c_{c.g.} + c_{п.х} + c_{вл}u\eta(l-l_0)] \frac{\partial t_r}{\partial y} + c_{п.}(t_r - t_m) \frac{\partial x}{\partial y} \right\} = \frac{\alpha_{F_1}}{m} F_1(t_r - t_m) - L_{п.} \frac{\partial G_{п.}}{\partial y} (l-l_0); \quad (1)$$

здесь $\eta(l-l_0) = \begin{cases} 0 & \text{при } l < l_0; \\ 1 & \text{при } l \geq l_0, \end{cases}$ y и l – координаты по высоте (по ходу газа) и по длине слоя; l_0 – координата начала зоны охлаждения; $G_{c.g.}$ – массовая скорость сухого газа; $G_{п.}$ – плотность орошения в зоне охлаждения; x – влагосодержание газа; u – содержание воды в водовоздушной смеси; α_{F_1} – коэффициент теплоотдачи от газа к окатышам; F_1 – удельная поверхность (средняя) окатышей; $L_{п.}$ – тепловой эффект испарения воды; m – коэффициент массивности, который равен $m = 1 + \frac{V_{i_k}}{5} = 1 + \alpha_{F_1} \frac{r_k}{5\lambda_k}$, где r_k – эквивалентный по поверхности радиус окатыша; λ_k – коэффициент теплопроводности окатышей; остальные обозначения являются общепринятыми.

Массовую скорость сухого газа можно представить в виде произведения: $G_{c.g.} = \rho_{c.g.} v_{0r}$, причем плотность сухого газа ($\rho_{c.g.}$) является аддитивной функцией его состава, а скорость фильтрации (v_{0r}) зависит от температуры и давления газа.

Уравнение теплообмена

$$\frac{G_m}{3,6H_{cл}B_T} (c_m + C_{вл}W) \frac{\partial t_m}{\partial l} = \frac{\alpha_{F_1}}{m} F_1(t_r - t_m) + \frac{G_m L_{п.}}{3,6H_{cл}B_T} \frac{\partial W}{\partial l} + \lambda_{эф} \frac{\partial^2 t_m}{\partial y^2} + \sum_i q_i f_i, \quad (2)$$

где G_m – производительность машины по сухой шихте, т/ч; $H_{cл}$ – высота слоя; B_T – ширина слоя (тележки); W – влажность окатышей; $\lambda_{эф}$ – коэффициент эффективной теплопроводности слоя; q_i – тепловой эффект i -го

химического процесса; f_i – интенсивность протекания i -го химического процесса.

Изменение давления газа по высоте слоя

$$\frac{\partial p_r}{\partial y} = - \frac{\zeta_{cл} \rho_r v_{0r}^2}{4r_k}; \quad (3)$$

здесь $\rho_r = \frac{\rho_{c.g.} + \rho_{п.х} + \rho_{вл}u\eta(l-l_0)}{1+x+u\eta(l-l_0)}$; $r_k = \frac{d_k}{2}$, а коэффициент сопротивления слоя принимают, например, по данным работы [2]:

$$\zeta_{cл} = \frac{3300}{Re_{cл}} + 16; \quad Re_{cл} = \frac{\rho_r v_{0r} d_k}{\mu_r}.$$

В зависимости от физического смысла граничных условий выражения (3) под ρ_r понимается либо абсолютное, либо избыточное давление.

Уравнение «влагообмена»

$$-\frac{G_m}{3,6H_{cл}B_T} \frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\beta_1}{m_m} F_1 \left(\frac{x_{п.} - x}{1+x} \right), \quad (4)$$

где β_1 – коэффициент массообмена от окатышей к газу; $x_{п.}$ – влагосодержание газа на поверхности окатышей; m_m – коэффициент массивности при массообмене, $m_m = \frac{\beta_1 d_k}{10\lambda_m}$; здесь λ_m – коэффициент теплопроводности окатыша. Эта величина должна быть связана с коэффициентом диффузии влаги в порах окатыша [7, 8], однако более удобным является ее подбор путем совмещения экспериментальных и расчетных кривых изменения влажности окатыша при сушке в неподвижном слое; иными словами, этот коэффициент является коэффициентом адаптации математической модели обжиговой машины в зоне сушки.

Вследствие сложности математической модели процесса обжига рудугольных окатышей в целом представляется целесообразным использовать для описания отдельных физико-химических явлений наиболее простые и наглядные представления. Так, например, предположим, что влагосодержание газа на поверхности окатышей равно влагосодержанию, соответствующему насыщению $x_{п.}$, причем величина $x_{п.}$ определяется в соответствии с рекомендациями вышеупомянутой работы А.В. Лыкова. Коэффициент массообмена β_1 , определяющий интенсивность сушки, находится из критериальных соотношений, предложенных в работах ВНИИМТ [9, 10].

Уравнение влагосодержания по высоте слоя (уравнение баланса влаги)

$$-G_{c.g.} \frac{\partial x}{\partial y} = \frac{G_m}{3,6H_{cл}B_T} \frac{\partial W}{\partial l} + \frac{\partial G_{п.}}{\partial y} \eta(l-l_0). \quad (5)$$

Уравнение баланса массы сухих газов

$$\frac{\partial G_{с.г}}{\partial y} = \sum_i f_i. \quad (6)$$

Точно такие же уравнения необходимо записать для каждого компонента газа.

Изменение количества воды (влаги) по высоте слоя при охлаждении окатышей водовоздушной смесью.

В общем случае процесс охлаждения слоя водовоздушной смесью в значительной степени определяется способом ее приготовления и типом форсунок, используемых для распыления воды. Кинетика испарения капель в силу стесненности и извилистости движения частиц жидкости усложняется явлениями коагуляции капель и растекания их по поверхности окатышей. Учесть эти обстоятельства в полной мере не представляется возможным, поэтому будем считать, что интенсивность испарения описывается следующим простым уравнением:

$$-\frac{\partial G_{и}}{\partial y} = \sigma_{и} F_1 \left(\frac{x_* - x}{1 + x} \right), \quad (7)$$

где $\sigma_{и}$ – эффективный коэффициент испарения;
 $x_* = \frac{0,622 p_*}{p_r - p_*}; \ln p_* = 25,403 - \frac{5176,085}{t_r + 273}$.

Параметр $\sigma_{и}$ является коэффициентом адаптации модели в зоне охлаждения.

При оптимизации конструктивных и режимных параметров обжиговой машины весьма полезной является информация о среднемассовой температуре колосников. Ее приближенно оценивают по выражению

$$\rho_k c_k V_k \frac{\partial t_k}{\partial l} = k_2 F_2 (t_{г|y=H_{сн}} - t_k). \quad (8)$$

Представленные выше уравнения являются основными при анализе теплотехнических аспектов процесса обжига. Однако они не могут быть решены до тех пор, пока не будут определены интенсивности протекания отдельных химических реакций (f_i). Учитывая сделанные ранее замечания об общей сложности комплексной математической модели, описание физико-химических аспектов процесса обжига желательнее оформлять в виде относительно простых математических уравнений, отражающих тем не менее правильно основные (характерные) стороны того или иного явления. Так как при обжиге рудугольных окатышей большой интерес представляет степень металлизации конечного продукта, то использование моделей восстановления оксидов железа, основанных на понятии среднеобъемной степени восстановления (по отнятому кислороду) [9 – 11] не представляется возможным. С другой стороны, нельзя использовать и хорошо известные модели фронтального восстановления [12 – 14], так как они не учитывают сложной структуры офлюсованного рудугольного окатыша.

В связи с отмеченным физическая модель развития физико-химических превращений в объеме окатыша построена на том, что любая химическая реакция протекает на всей внутренней и внешней поверхности окатыша, причем действующий потенциал процесса (разность концентраций газообразного реагента) является функцией радиуса окатыша, константы скорости реакции и коэффициента диффузии реагента в макропорах окатыша. В то же время реагирование в индивидуальной грануле имеет фронтальный характер, т.е. степень завершения процесса может быть выражена через радиусы непрореагировавших объемов гранул ξ_p , $\xi_{и}$ и ξ_r . Разумеется такого рода интерпретация физико-химического процесса является в значительной степени идеализацией и упрощением реальной картины химического взаимодействия, так как она не учитывает изменения внутренней структуры окатыша в процессе обжига. Однако принимая во внимание, что практически все кинетические коэффициенты определяются экспериментально, а следовательно, косвенно учитывают изменение макро- и микропористости при обжиге, ее следует признать приемлемой.

Как уже отмечалось ранее, из всего множества физико-химических явлений, сопровождающих обжиг рудугольных окатышей, данная математическая модель непосредственно учитывает лишь основные явления, т.е. те из них, которые находят отражение в материальном балансе технологии обжига и могут быть проверены экспериментально. Для рудных составляющих окатыша первым таким явлением служит процесс окисления двухвалентного оксида железа. Динамику окисления рудной гранулы в предположении, что ионы двухвалентного железа распределены в объеме рудной гранулы равномерно и, используя известные из литературы решения [13 – 18], описывает уравнение

$$\rho_p x_{FeO} \frac{\partial \xi_p}{\partial \tau} = \frac{9 \rho_{O_2} k_{ок} (O_2 - O_2^{\circ}) f(\mu_{ок} r_p)}{\frac{k_{ок} \xi_p}{D_p} \frac{r_p - \xi_p}{r_p} + 1 + \frac{k_{ок} \xi_p^2}{\beta_{O_2} r_p^2}}; \quad (9)$$

здесь x_{FeO} – начальная концентрация вюститита в рудной грануле; D_p – коэффициент диффузии кислорода в макропорах гранулы; $k_{ок}$ – константа скорости окисления; β_{O_2} – коэффициент массообмена от газа в макропорах окатыша к поверхности гранулы (по кислороду); O_2 и O_2° – действующая и равновесная концентрации кислорода в газе;

$$f(\mu_{ок} r_p) = \frac{\mu_{ок} r_p \operatorname{cth}(\mu_{ок} r_p) - 1}{(\mu_{ок} r_p)^2}; \mu_{ок} = \sqrt{\frac{k_{V_{ок}}}{D_{ок}^{O_2}}},$$

$k_{V_{ок}}$ – объемная константа скорости окисления; $D_{ок}^{O_2}$ – эффективный коэффициент диффузии кислорода в макропорах окатыша.

Сомножитель $f(\mu_{ок}, r_p)$ представляет собой коэффициент усреднения объемной концентрации кислорода по радиусу окатыша. Величину $k_{V_{ок}}$ приближенно определяют по выражению

$$k_{V_{ок}} = \frac{3DR}{r_p^3} \xi_p^2 \frac{\rho_M}{\rho_p}$$

Степень окисленности рудной гранулы связана с текущим радиусом непрореагировавшего объема выражением

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = -\frac{3}{r_p^3} \xi_p^2 \frac{\partial \xi_p}{\partial \tau},$$

или более просто

$$\Psi = \Psi_0 - \left(1 - \frac{\xi_p^3}{r_p^3}\right),$$

а скорость (интенсивность протекания) реакции окисления определяется выражением

$$f_{ок} = -DR\rho_M \chi_{V_2} x_{FeO} \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}, \quad (10)$$

Тогда количество теплоты, выделившееся в процессе окисления, составит

$$q_{ок} f_{ок} = -DR\rho_M \chi_{V_2} x_{FeO} q_{ок} \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}, \quad (11)$$

а изменение содержания кислорода в газе вследствие этой реакции будет определяться как

$$\frac{\partial}{\partial y} (\rho_{O_2} O_2 v_{0r}) = -\frac{1}{9} DR\rho_M \chi_{V_2} x_{FeO} \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}. \quad (12)$$

Необходимо подчеркнуть, что в процессе расчета параметров газа и материала по длине обжиговой машины помимо величин, определяемых вышеприведенными уравнениями, необходимо также учитывать изменение плотности гранулы и массовой доли руды в шихте по мере увеличения степени окисленности Ψ .

Аналогичным образом описывается динамика изменения размеров единичной известняковой гранулы [12]:

$$-0,4396\rho_{и} \frac{\partial \xi_{и}}{\partial \tau} = \frac{\rho_{CO_2} k_{дис} (CO_2^\circ - CO_2)}{CO_{2и}^\circ + \frac{k_{дис}}{D_{иCO_2}} \xi \frac{r_{и} - \xi_{и}}{r_{и}}}, \quad (13)$$

где $k_{дис}$ – константа скорости диссоциации известняка; $D_{иCO_2}$ – коэффициент диффузии CO_2 в микропорах известняковой гранулы; CO_2° и $CO_{2и}^\circ$ – действующая и равновесная концентрации диоксида углерода в макропорах окатыша.

Все остальные параметры процесса, связанные с известняком, выражаются через радиус непрореагировавшего объема известняковой гранулы, а именно:

– изменение текущих долей (по массе) известняка и извести

$$\frac{\partial CaCO_3}{\partial \tau} = \frac{3DI}{r_{и}^3} \xi_{и}^2 \frac{\partial \xi_{и}}{\partial \tau},$$

$$\frac{\partial CaO}{\partial \tau} = -0,5603 \frac{\partial CaCO_3}{\partial \tau};$$

– скорость реакции диссоциации

$$f_{дис} = \rho_M \chi_{V_2} \frac{\partial CaCO_3}{\partial \tau};$$

– затраты теплоты на диссоциацию

$$f_{дис} q_{дис} = \rho_M \chi_{V_2} q_{дис} \frac{\partial CaCO_3}{\partial \tau};$$

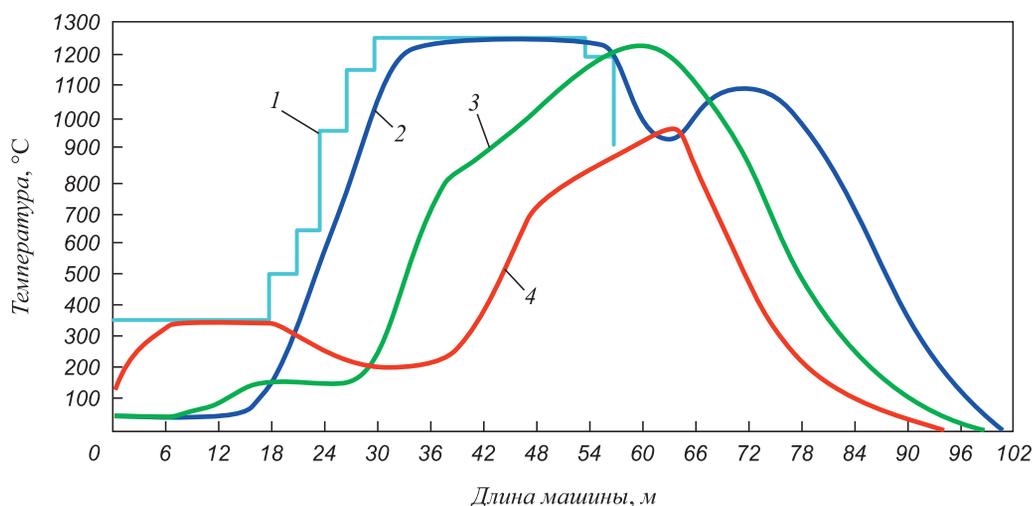
– изменение объемной доли CO_2 за счет диссоциации известняка

$$\frac{\partial}{\partial y} (\rho_{CO_2} CO_2 v_{0r}) = -0,4396\rho_M \chi_{V_2} \frac{\partial CaCO_3}{\partial \tau}.$$

Точно так же, как и при описании реакции окисления магнетита, в данном случае необходимо учитывать, что в процессе диссоциации известняка изменяются плотность окатыша и массовая доля известняка в шихте.

При достаточно высокой температуре окатышей начинается взаимодействие диоксида углерода, содержащегося в газе или выделившегося при диссоциации известняка, с углеродом топлива. Механизм и кинетика реакции газификации углерода диоксидом углерода или водяными парами изучались во многих работах; весьма подробно они изложены в монографии [12]. Однако совместная газификация углерода смесью этих газов в литературе математически не описана. Использование для этой цели методики, изложенной в работе [12], приводит к выражениям весьма сложным для применения в комплексной математической модели технологии обжига. Поэтому целесообразно воспользоваться для описания процесса газификации углерода топлива приближенными соотношениями, качественно верно отображающими влияние состава газовой фазы на скорость процесса.

По аналогии с полуэмпирическим выражением, предложенным в работах [13, 20] для описания газификации доменного кокса фурменным газом, целесообразно принять, что процесс газификации углерода топлива на его реакционной поверхности смесью диоксида углерода и водяного пара в присутствии водорода и оксида углерода (кинетическая сторона процесса) описывается следующим уравнением:



Расчетное изменение температур слоя окатышей по длине обжиговой машины ОК-306:
 1 – температура газа; 2 – 4 – температура окатышей: 2 – $y = 0$ м, 3 – $y = 0,2$ м, 4 – $y = 0,4$ м

Estimated change of temperatures of pellets layer along the length of burning machine OK-306:
 1 – gas temperature; 2 – 4 – pellets temperature: 2 – $y = 0$ m, 3 – $y = 0.2$ m, 4 – $y = 0.4$ m

$$-p_r \frac{\partial \xi_r}{\partial t} = v_{\text{газ}} = \frac{1}{C^p} \left[k_{\text{газ},1} \text{CO}_2 + k_{\text{газ},2} \text{H}_2\text{O} \times \left(1 + \frac{p_r}{101\,325} k_2 \text{CO} \right) \right] \left\{ \left(1 + \frac{p_r}{101\,325} k_4 \text{H}_2 \right) \times \left[\frac{101\,325}{p_r} + k_1 \text{CO} + k_2 \text{CO} + k_3 \text{H}_2\text{O} + \frac{p_r}{101\,325} k_1 k_3 \text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O} \right]^{-1} \right\}$$

Учет диффузионных аспектов процесса осуществляется приближенно в соответствии с методикой, развитой в работах [13 – 15, 18]; коэффициенты $k_{\text{газ},1}$, $k_{\text{газ},2}$, k_1 ÷ k_4 определяются экспериментально.

Знание скорости реакции газификации и ее отдельных составляющих позволяет, как и ранее, представить выражения для интенсивностей протекания процесса, мощности стока теплоты, изменения объемных долей CO_2 , CO , H_2O , H_2 и т.д. Принципиально эти выражения (по форме) аналогичны и не отличаются от представленных выше и поэтому здесь не приводятся.

В качестве иллюстрации возможностей математической модели на рисунке представлены результаты расчета распределения температур окатышей по высоте слоя и длине обжиговой машины.

Наибольший интерес и в то же самое время наибольшие затруднения вызывает математическое описание процесса восстановления оксидов железа рудных гранул окатыша. Это описание довольно громоздко и поэтому составляет содержание дальнейшей работы.

Выводы. Выполнена разработка математических моделей процесса обжига рудоугольных окатышей на конвейерной машине. Хотя эта модель предназначена для анализа процесса обжига офлюсованных рудоугольных окатышей, ее возможности неизмеримо шире. Она позволяет исследовать процессы окислительного обжига

железорудных окатышей с использованием газогорелочных устройств для сжигания газа в слое и многое другое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков и др. - М.: Metallurgy, 1972. - 432 с.
2. Охлаждение агломерата и окатышей / Н.М. Бабушкин, С.Г. Братчиков, Г.Н. Намятов и др. - М.: Metallurgy, 1975. - 208 с.
3. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. - М.: Metallurgy, 1978. - 248 с.
4. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. - М.: ИЛ, 1963. - 256 с.
5. Слеттери Дж. С. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах / Пер. с англ. - М.: Энергия, 1978. - 448 с.
6. Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns // Chem. Eng. Prog. 1957. Vol. 48. P. 89 – 94.
7. Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 471 с.
8. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. - М.: Наука, 1987. - 492 с.
9. Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А., Бабушкин Н.М. Математическое описание явлений тепло- и массообмена в доменной печи. - В кн.: Теплотехника доменного и агломерационного процессов. Сб. науч. трудов ВНИИМТ № 14. - М.: Metallurgy, 1966. С. 5 – 37.
10. Боковиков Б.А. Методы расчета слоевых процессов и агрегатов для металлзации и их развитие. - В кн.: Физикохимия прямого получения железа. - М.: Наука, 1977. С. 84 – 87.
11. Анализ шахтного восстановительного процесса с помощью математической модели // Б.А. Боковиков, В.Ю. Поволоцкий, А.И. Гиммельфарб, А.М. Неменов / Прямое получение железа и порошковая металлургия: Тематич. отрасл. сб. № 1. - М.: Metallurgy, 1974. С. 107 – 113.
12. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов; изд. 2-е, ч. 1. - Свердловск: Metallurgizdat, 1962. - 671 с.
13. Ростовцев С.Т. Теория металлургических процессов. - М.: Metallurgizdat, 1956. - 514 с.
14. Szekeley J., Evans J.W., Sohn H.Y. Solid – Gas Reactions. - N.Y.: Academic Press, 1976. - 400 p.

15. Yagi I., Szekely J. Mathematical formulation on iron oxide pellets in moving beds with nonuniform gas and solids flow // *Trans. Iron and Steel Inst. Japan*. 1977. No. 10. P. 569 – 575.
16. Funghini A., Fontana P., Marchi G. De. In: *The operation of the blast furnace: theory and practice*. – Arles: 1980, Vol. 2, p. B. 2.1 – B. 2.6.
17. Takahashi Y., Takahashi R. In: *Proc. VIII Joint Japan – USSR Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. – Tokyo, 1981. P. 78 – 92.
18. Богданди Л., Энгель Г.Ю. Восстановление железных руд. – М.: Metallurgy, 1971. – 520 с.
19. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
20. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.

Поступила 5 октября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 4, pp. 329–335.

MATHEMATICAL MODEL OF BURNING PROCESS OF COAL-ORE PELLETS ON CONVEYOR MACHINE

V.S. Shvydkii, Yu.G. Yaroshenko, N.A. Spirin, V.V. Lavrov

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yel'tsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Development of mathematical models of coal-ore pellets burning process was executed on the conveyor machine. The problems of heat transfer between gas and material in the transversally blown dense layer are considered. The description is given for the following aspects: the phenomena of drying and cooling of materials (including by air-and-water mixture), oxidation processes of ore constituents of pellets, dissociation of limestone and burning of fuel constituents of material. Equalizations of the engineering mathematical models of iron oxides recovery and burning of fuel granules and of heating of machine's fire grate (carts) are resulted. When calculating the development of physicochemical transformations in the volume of the pellet, it was assumed that any chemical reaction from the surface of the granules of a particular component proceeds over the entire inner and outer surfaces of the pellet, and the process potential (the difference in the concentration of gaseous reactant) is a function of the pellet's radius, the diffusion coefficient of reagent in micropores of the pellet. At the same time, the response in the individual pellet is frontal, and the completion degree of the process can be expressed through the radii of unreacted pellet volumes. Among all physicochemical phenomena accompanying the process of calcination of coal-ore pellets, this mathematical model directly takes into account only the main ones, which are reflected in the material balance and can be verified experimentally. Finite-difference approximation of equations of the mathematical model together with the expressions for calculating the thermophysical characteristics of heat carriers, heat and mass transfer coefficients, thermochemical and kinetic constants, etc. have formed the basis of a numerical model of a conveyor burning machine that produces metallized pellets. The implementation of this model in the particular case is presented in the article.

Keywords: stratified process, heat exchange, granules of pellet, mathematical description, engineering models, equivalent descriptions.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-329-335

REFERENCES

1. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. etc. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass transfer in the dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.).
2. Babushkin N.M., Bratchikov S.G., Namyatov G.N. etc. *Okhlazhdenie aglomerata i okatyshai* [Cooling of agglomerate and pellets]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 208 p. (In Russ.).
3. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. etc. *Teplotekhnika domennogo protsesssa* [Heat engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
4. Serrin James. *Mathematical Principles of Classical Fluid Mechanics. Series: Encyclopedia of Physics*. Berlin – Göttingen – Heidelberg: Springer-Verlag OHG, 1959. (Russ.ed.: Serrin J. *Matematicheskie osnovy klassicheskoi mekhaniki zhidkosti*. Moscow: IL, 1963, 256 p.).
5. Slattery John S. *Momentum, energy, and mass transfer in continua*. New York: McGraw-Hill, 1971, 679 p. (Russ.ed.: Slattery J. S. *Teoriya perenosha impul'sa, energii i massy v sploshnykh sredakh*. Moscow: Energiya, 1978, 448 p.)
6. Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* 1957, vol. 48, pp. 89–94.
7. Lykov A.V. *Teoriya sushki* [Theory of drying]. Moscow: Energiya, 1968, 471 p. (In Russ.).
8. Frank-Kamenetskii D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Nauka, 1987, 492 p. (In Russ.).
9. Timofeev V.N., Bokovikov B.A., Babushkin N.M. Mathematical description of the phenomena of heat and mass transfer in the blast furnace. In: *Teplotekhnika domennogo i aglomeratsionnogo protsessov. Sb. nauch. Trudov VNIIMT № 14* [Heat engineering of blast furnace and agglomeration processes. Coll. of sci. works of VNIIMT no. 14]. Moscow: Metallurgiya, 1966, pp. 5–37. (In Russ.).
10. Bokovikov B.A. Calculating methods for layer processes and metallization units and their development. In: *Fizikokhimiya pryamogo polucheniya zheleza* [Physicochemistry of direct iron production]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 84–87. (In Russ.).
11. Bokovikov B.A., Povolotskii V.Yu., Gimmel'farb A.I., Nemenov A.M. Analysis of the mine recovery process using the mathematical model. In: *Pryamoe poluchenie zheleza i poroshkovaya metallurgiya: Tematich. otrasl. sb. no. 1* [Direct iron production and powder metallurgy: Thematic industrial coll. no. 1]. Moscow: Metallurgiya, 1974, pp. 107–113. (In Russ.).
12. Esin O.A., Gel'd P.V. *Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov; ch.1* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes; part 1]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1962, 671 p. (In Russ.).
13. Rostovtsev S.T. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 514 p. (In Russ.).
14. Slattery J., Evans J.W., Sohn H.Y. *Solid – gas reactions*. N.Y.: Academic Press, 1976, 400 p.
15. Yagi I., Szekely J. Mathematical formulation on iron oxide pellets in moving beds with nonuniform gas and solids flow. *Trans. Iron and Steel Inst. Japan*. 1977, no. 10, pp. 569–575.
16. Funghini A., Fontana P., Marchi G. De. In: *The operation of the blast furnace: theory and practice*. Arles: 1980, vol. 2, pp. B. 2.1–B. 2.6.
17. Takahashi Y., Takahashi R. In: *Proc. VIII Joint Japan – USSR Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. Tokyo: 1981, pp. 78–92.
18. Bogdandy L., Engell H.-J. *Die Reduktion der Eisenerze*. Duesseldorf: Springer Verlag, 1967, 539 p. (Russ.ed.: Bogdandy L., Engell H.-J. *Vosstanovlenie zheleznykh rud*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 519 p.).
19. Patankar Suhas V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. (Russ.ed.: Patan-

kar S. *Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 152 p.).

20. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobaev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Burykin A.A. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in the automated process control system]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2014, 558 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by Decree no. 211 of the Government of the Russian Federation, Contract no. 02.A03.21.0006.

Information about the authors:

V.S. Shvydkii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (vshvid@isnet.ru)

Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (yury-y@planet-a.ru)

N.A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (n.a.spirin@urfu.ru)

V.V. Lavrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (v.v.lavrov@urfu.ru)

Received October 5, 2016
